2001—2021年黄河流域植被覆盖变化及其驱动因素

吴思源，　郝利娜

（成都理工大学地理与规划学院，四川 成都　610059）

摘　要：黄河流域作为中国重要的生态屏障和经济走廊，揭示其植被覆盖变化的响应机制，有利于促进生态、经济和社会的协调发展。本文基于MOD13A3、气候和经济数据，采用趋势分析和相关分析法分析黄河流域2001—2021年植被覆盖变化特征，探究气候与人类活动对植被的影响机制。结果表明：(1) 2001—2021年，研究区植被覆盖增加速率为0.35%·a^{-1}，81.33%的地区植被覆盖呈增长趋势，关中平原与中原城市群植被发生退化。(2) 时间尺度上，黄河流域NDVI对气候和人类活动的响应存在滞后性；空间尺度上，NDVI与降水和气温表现为正相关，NDVI对降水的响应集中在200 mm等降水量线，对气温的响应分布在高原亚寒带、中温带地区。人类经济活动对NDVI的影响以正相关为主，其中NDVI与第一产业呈正相关，与第二产业呈负相关，面积占比分别为51.45%和7.47%。(3) 黄河流域植被变化受气候和人类活动的双重影响，其中人类经济活动因子驱动面积占比55.25%，占据主导地位，表明经济发展等人类活动对植被的生长和分布影响显著，超过了降水和气温变化的作用。

关键词：NDVI；气候；人类活动；植被覆盖变化；驱动因素；黄河流域

世界气象组织发布《2022年全球气候状况报告》指出，全球气温持续上升，部分地区出现干旱、洪水等自然灾害，生态系统和人类生活受到严重影响[1]。植被作为生态系统的重要组成部分，对于保护水土、净化空气、调节气候以及维持物种多样性具有不可替代的作用[2-3]。

为了研究植被覆盖变化，多数学者采用归一化植被指数(NDVI)作为评估指标，该指数对植被覆盖变化敏感，能有效捕捉不同植被类型和覆盖程度的变化[4]。NDVI通常受气候变化和人类因素的共同影响。气温、降水和光照等因素影响植被的生长、分布和类型，而社会经济、政策制度等也对植被覆盖变化起重要作用[5-7]。气候因子对NDVI的影响具有空间异质性，而植被对气候的响应呈非线性关系。降水的增加促进植被生长，温度的升高提高植被的呼吸作用，但温度过高，蒸散加强，植被的发育受到抑制[8-9]。而人类活动对NDVI的影响主要表现在城市化的快速发展破坏了植被、空气污染使植被吸收能量减少，出现了经济发达、人口密集地区植被分布少，远离城市地区植被茂密的现象[5,10]。

黄河流域是中国生态脆弱区之一，也是我国重要的生态安全屏障，其生态保护和高质量发展尤为重要[11-12]。由于气候变暖和人类活动等外界因素影响，黄河流域植被覆盖也在不断发生改变。很多学者对黄河流域植被覆盖变化特征及其影响因素进行了研究，赵倩倩等[13]运用线性回归和偏相关分析法研究了近20 a黄河流域植被指数与气候的相关性，发现NDVI与气温和降水的关系具有较明显的空间异质性；解晗等[14]采用趋势分析和相关分析法，探讨了黄河流域两种植被指数的时空变化特征及其对气候的响应机制。当前，多数学者偏向研究黄河流域植被覆盖变化与气候的关系[15-18]，其中一部分学者利用回归残差法分离出人类活动对植被的作用[17-18]，但鲜有人考虑人口密度、经济发展等具体因素对植被覆盖的影响。事实上，GDP反映了经济发展水平与环境污染的关系，是评估人类活动对植被覆盖和生态系统影响的重要指标。随着工业化和城市化进程加快，土地利用方式和植被破坏程度发生变化，第一、二产业则直接反映农业、工业等生产活动对植被的影响[19]。

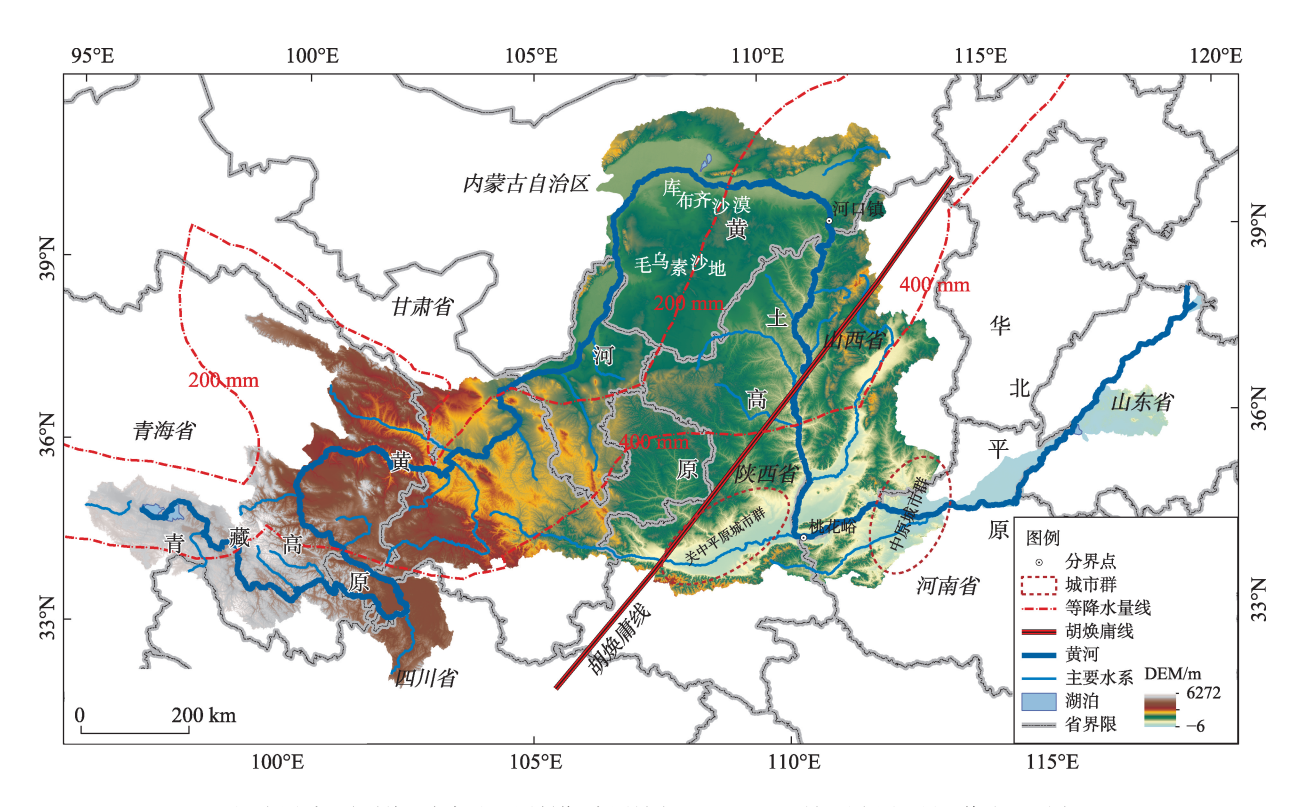
收稿日期：2024-03-06；　**修订日期**：2024-04-21
基金项目：中国博士后科学基金(2020T130074)
作者简介：吴思源(2000-)，女，硕士研究生，主要研究方向为生态环境. E-mail: 2022020006@stu.cdut.edu.cn
通讯作者：郝利娜. E-mail: hao_ln@qq.com

综上所述,本文选取了GDP和第一、二产业增值作为人类经济活动的指标,以探讨其对植被的影响,同时对气候与植被的关系也进行了分析,旨在揭示什么因素对植被变化的影响更为显著,为未来的生态保护和恢复工作提供科学依据和重要参考,促进黄河流域生态环境的可持续发展。

1 研究区概况

黄河流域是中国北方最大的流域,涉及青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南等多个省份(图1)。黄河以内蒙古河口镇和河南省桃花峪为分界点,分为上游、中游和下游,流经青藏高原、内蒙古高原、黄土高原以及华北平原。流域面积达79.5×10^4 km^2,区内年降水量为116.4~914.7 mm,年均温为-18.4~16.1 ℃(图2)。

"胡焕庸线"发端于人口密度差异,深刻揭示了我国气候、农业生产方式和经济等诸多因素的分布格局[20]。以"胡焕庸线"为分界线,流域东西两侧经



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)1822号,对底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

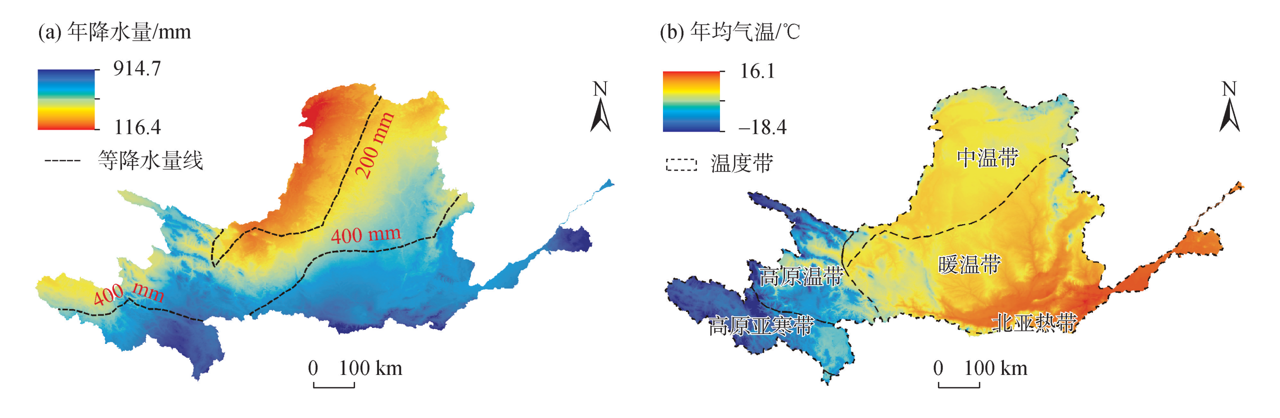


图2 黄河流域多年降水量和平均气温

Fig. 2 Multi-year precipitation and average temperature in the Yellow River Basin

济差异悬殊。“胡线以东”地区为季风气候,雨热同期,降水充沛,以平原、丘陵为主要自然景观,农耕经济发达;“胡线以西”地区为温带大陆性气候和高寒气候,干旱少雨,以草原、高原和沙漠为自然景观,以畜牧业为主。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

(1) 基础地理数据

包括黄河流域边界数据和30 m分辨率数字高程模型,矢量边界源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn),DEM源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (http://www.ncdc.ac.cn)。

(2) 植被指数(NDVI)数据

NDVI源于NASA官网(https://www.nasa.gov)发布的MOD13A3植被指数数据集,时间分辨率为月。经过拼接、投影、裁剪和重采样等步骤得到研究区逐月NDVI数据,再利用均值法计算2001—2021年逐年的NDVI均值数据,选取指数值>0的区域进行研究。

(3) 气象数据

采用1901—2022年中国1 km分辨率逐月降水量和平均气温数据集,源于国家地球系统科学数据中心—黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn)[21]。经过格式转换、裁剪、均值处理得到2001—2021年黄河流域逐年降水量和平均气温。

(4) 经济数据

包括2001—2021年黄河流域内428个区和县的国内生产总值、第一产业增值和第二产业增值数据,来源于《中国县域统计年鉴》、地区统计年鉴和统计公报,针对少量缺失数据采用三次样条插值法补齐。

上述数据统一地理坐标系为GCS_WGS_1984,投影坐标系为WGS_1984_UTM_Zone_48N,空间分辨率为1 km。

2.2 研究方法

2.2.1 *趋势分析法* 采用一元线性回归分析和最小二乘法,逐像元拟合2001—2021年每个栅格NDVI值的斜率,分析近21 a黄河流域植被覆盖变化的趋势和速率,公式如下[22-23]:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}\left(i \times \mathrm{NDVI}_i\right) - \sum_{i=1}^{n} i \times \sum_{i=1}^{n} \mathrm{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \quad (1)$$

式中:n为研究年限;NDVI_i为第i年的NDVI值;i取值为1,2,3,…,21;$slope$为NDVI变化速率,当$slope>0$时,NDVI呈增加态势,反之则减少。

为进一步评价植被覆盖变化的状况,本文采用F检验对NDVI变化趋势进行显著性分析。

2.2.2 *相关分析法*

(1) 简单相关分析

简单相关分析是度量两个变量之间的线性关系,反应变量之间每单位变化时的相似程度,公式如下[24-25]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(y_i - \bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}} \quad (2)$$

式中:r_{xy}为变量x与y的简单相关系数;n为样本数量;x_i、y_i为第i年x,y的值;$\bar{x}$、$\bar{y}$分别为变量x、y的均值。

(2) 偏相关分析

偏相关分析是在多种变量的情况下,控制其他变量的影响,揭示其中两个变量之间的变化关系。一阶偏相关系数和二阶偏相关系数的公式分别为[26-27]:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} r_{yz}}{\sqrt{\left(1 - r^2_{xz}\right)\left(1 - r^2_{yz}\right)}} \quad (3)$$

$$r_{xy,zm} = \frac{r_{xy,z} - r_{xm,z} r_{ym,z}}{\sqrt{\left(1 - r^2_{xm,z}\right)\left(1 - r^2_{ym,z}\right)}} \quad (4)$$

式中:$r_{xy,z}$表示控制变量z为常数后x与y的一阶偏相关系数;$r_{xy,zm}$表示控制变量z、m为常数后x与y的二阶偏相关系数。

采用t检验法对偏相关系数进行显著性检验。

(3) 复相关分析

复相关分析是衡量因变量与多个自变量之间的综合关系,公式如下[28-29]:

$$r_{x,yzm} = \sqrt{1 - \left(1 - r^2_{xy}\right)\left(1 - r^2_{xz,y}\right)\left(1 - r^2_{xm,yz}\right)} \quad (5)$$

式中:$r_{x,yzm}$表示因变量x与自变量y、z、m的复相关系数。

采用F检验法对复相关系数进行显著性检验。

2.2.3 *植被覆盖驱动分区准则* 参考解晗等[14,30-31]提出的驱动分区方法,结合研究区实际情况对流域植被指数变化的驱动因素进行分类,制定驱动分区准则如表1所示。

表1 黄河流域植被覆盖驱动分区准则

Tab. 1 Guidelines for vegetation cover-driven zoning in the Yellow River Basin

驱动因素类型	分区准则			
	*R*ndvi-t	*R*ndvi-p	*R*ndvi-g	*R*ndvi-tpg
降水、气温因素驱动	$t>t_{0.05}$			$F>F_{0.05}$
		$t>t_{0.05}$		$F>F_{0.05}$
	$t>t_{0.05}$	$t>t_{0.05}$		$F>F_{0.05}$
GDP因素驱动			$t>t_{0.05}$	$F>F_{0.05}$
降水、气温和GDP	$t>t_{0.05}$		$t>t_{0.05}$	$F>F_{0.05}$
因素共同驱动		$t>t_{0.05}$	$t>t_{0.05}$	$F>F_{0.05}$
	$t>t_{0.05}$	$t>t_{0.05}$	$t>t_{0.05}$	$F>F_{0.05}$
	$t\leq t_{0.05}$	$t\leq t_{0.05}$	$t\leq t_{0.05}$	$F>F_{0.05}$
未通过显著性检验区				$F\leq F_{0.05}$

注：*R*ndvi-t, *R*ndvi-p, *R*ndvi-g分别表示NDVI与气温、降水、GDP的偏相关系数；*R*ndvi-tpg表示NDVI与气温、降水和GDP的复相关系数；$t_{0.05}$为t检验的0.05显著性水平；$F_{0.05}$为F检验的0.05显著性水平。

3 结果与分析

3.1 NDVI时空变化

3.1.1 时间变化特征 2001—2021年黄河流域植被NDVI均值介于0.26~0.36(图3a)，呈上升趋势，变化率为0.35%·a^{-1}(P<0.01)，植被覆盖有所改善。其中夏季植被覆盖状况最好且增长趋势最为显著，增长率为0.53%·a^{-1}(图3b)。经过一元线性回归方程拟合斜率的分析，发现NDVI在不同季节均表现出上升趋势，其增长幅度依次为：夏季>秋季>春季>冬季，表明了黄河流域植被覆盖整体上呈现向好的发展态势。

结合研究区植被特征，将NDVI分为低植被覆盖[0~0.16)、中低植被覆盖[0.16~0.32)、中植被覆盖[0.32~0.48)、中高植被覆盖[0.48~0.64)和高植被覆盖[0.64~1)5个等级。2001—2021年黄河流域高植被覆盖等级占比最少，主要是以中植被和中低植被覆盖为主，总体趋势显示，中、中高和高植被覆盖区域逐渐增加，而低植被和中低植被覆盖的面积逐渐减少(图4)。

3.1.2 空间变化特征 黄河流域2001—2021年NDVI多年均值介于0~0.75，空间上在青海省呈现出由西向东逐渐递增，其余省份呈东南向西北递减的分布格局(图5a)。根据NDVI多年均值进行覆盖等级划分(图5b)，其中研究区中低植被覆盖最广，面积占比40.22%，主要分布在青海西部、甘肃北部、宁夏

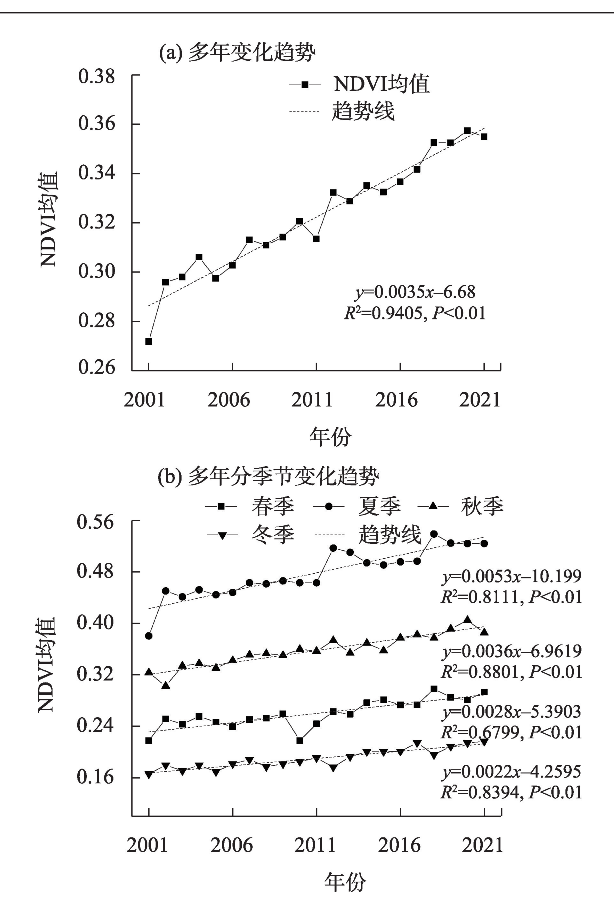


图3 2001—2021年黄河流域NDVI时间序列变化

Fig. 3 Changes of NDVI time series in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

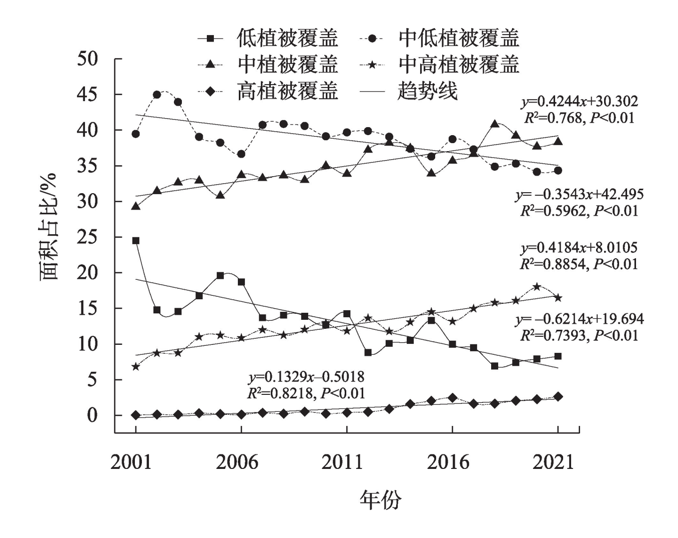


图4 2001—2021年植被覆盖等级面积占比变化

Fig. 4 Changes in area share of vegetation coverage grade from 2001 to 2021

南部和内蒙古中东部等地区，这些地区长年过度放牧导致草地退化和荒漠化严重；其次以中植被覆盖面积占比最多，达35.54%，主要分布于青海省东部、

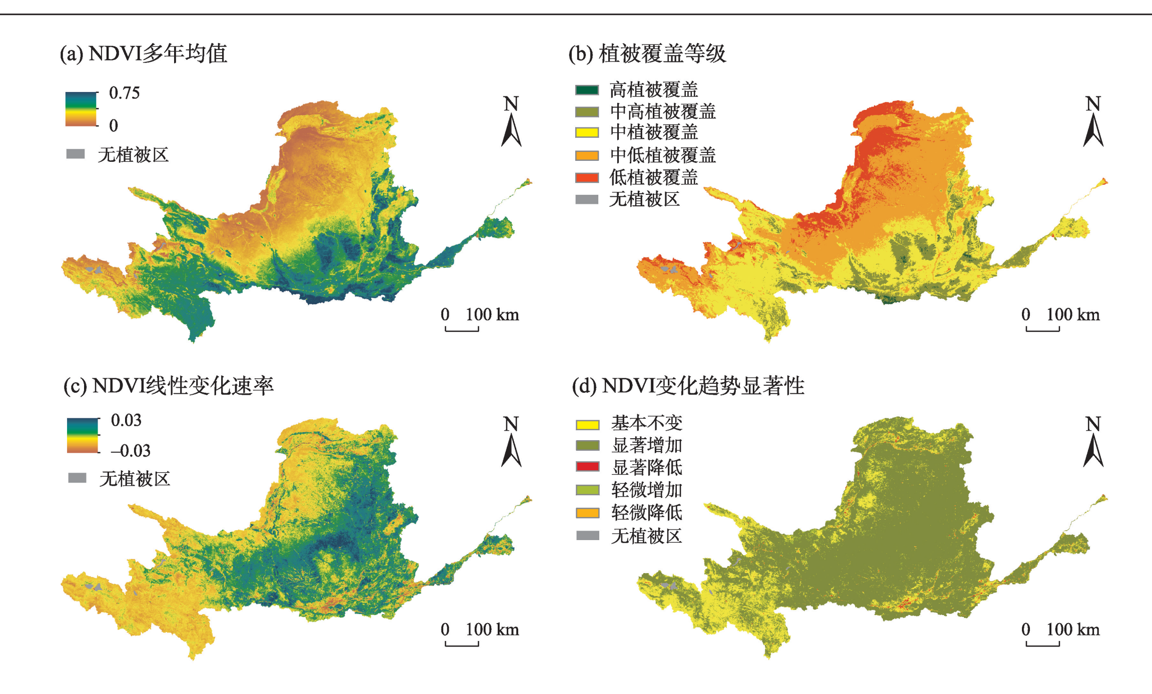


图5 黄河流域2001—2021年NDVI多年均值(a)、覆盖等级(b)、变化趋势(c)及其显著性(d)

Fig. 5 Multi-year mean value (a), coverage grade (b), change trend (c) and its significance (d) of NDVI in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

甘肃省南部以及黄河下游地区;而低植被覆盖面积占比11.31%,主要集中在宁夏中部和内蒙古西部地区,其中库布齐沙漠和毛乌素沙地沙化严重,植被受损。

研究区NDVI的变化率介于-0.03~0.03 a^{-1}(图5c),黄河流域植被覆盖面积整体呈增加趋势,得益于黄河流域各省相继实施退牧还草、风沙治理、退耕还林还草等生态保护工程,生态环境显著改善。结合显著性检验(图5d)可知,流域内植被显著增加与轻微增加的区域面积占比81.33%,显著降低和轻微降低的占比0.87%,植被减少现象主要出现在西安市和咸阳市交界处、洛阳市北部等人类活动频繁地区。

3.2 NDVI与气候相关性分析

3.2.1 时间尺度上NDVI与气候相关性分析 将NDVI与降水和气温分别进行相关性分析(图6),发现NDVI与降水具有较显著的正相关性(r=0.555, P<0.05),但与气温不存在显著相关性(r=0.301, P>0.05),NDVI对降水的响应大于气温。整体上,NDVI变化趋势的波峰波谷与气候因子的波峰波谷并非同时出现,而是表现出一定的滞后,说明NDVI对气候因子的响应存在滞后性。

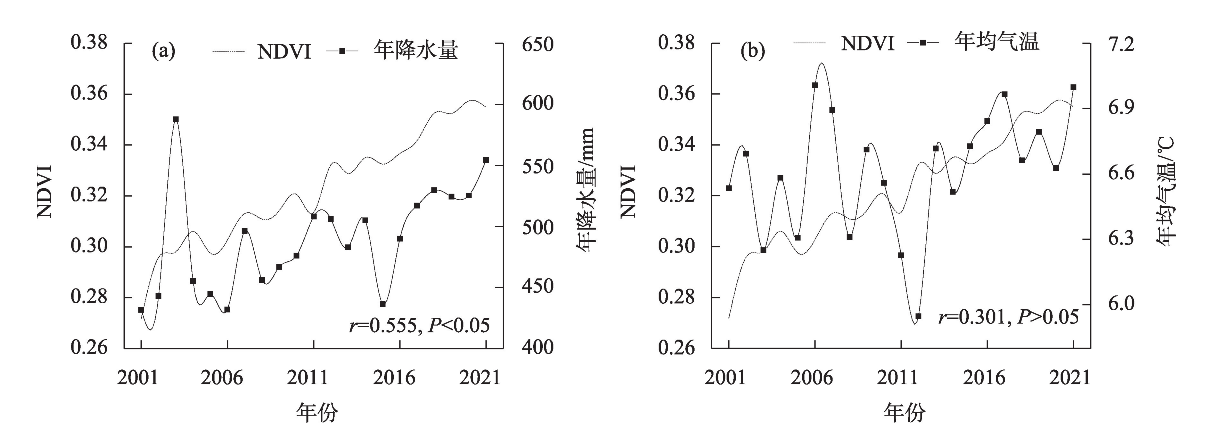


图6 2001—2021年黄河流域NDVI与气温及降水变化相关分析

Fig. 6 Correlation analysis of NDVI with temperature and precipitation changes in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

3.2.2 空间尺度上NDVI与气候相关性分析 黄河流域NDVI与降水的偏相关系数为-0.79~0.91(图7a),与降水呈正相关的区域面积占整个研究区的17.31%,其中偏相关系数>0.6的区域占比4.22%。NDVI与降水显著正相关区域主要分布在200 mm等降水量线周围地区,这些地区多干旱,水分蒸发快,土壤干燥,降水量小,难以满足植物的生长需要,从而影响植被的生长和覆盖率。

NDVI与气温的偏相关系数为-0.81~0.89(图7b),其中呈正相关的面积占7.12%,负相关占1.37%,以正相关为主,主要分布在高原亚寒带和中温带地区。青海省果洛藏族自治州和四川省甘孜藏族自治州地区海拔高,气温常年低,植物无法适应极端的寒冷气候,发育速度受到限制。黄河中游北部的呼和浩特市、包头市和乌兰察布市等地区,位处中温带,夏季温暖冬季寒冷,常年年均温6 ℃,较低的温度影响了植被生长的速度和茂密程度,使得植被在该地区的覆盖率相对较低。

3.3 NDVI与人类活动相关性分析

3.3.1 时间尺度上NDVI与人类活动相关性分析 将NDVI与年均GDP、第一产业增值和第二产业增值进行相关分析(图8),发现NDVI与三者均存在较显著的正相关关系,且NDVI与三种经济因子的变化同步性较好(r>0.9,P<0.05)。

3.3.2 空间尺度上NDVI与人类活动相关性分析

(1) 产业分布对植被覆盖的影响

黄河流域内NDVI和第一产业增值偏相关系数为-0.96~0.99(图9a),0.84%的地区呈负相关,集中分布在关中平原城市群,零星分布于甘肃和宁夏;51.45%的地区呈正相关,黄河流域下游华北平原农耕经济发达,植被茂盛。相反,上游和中游地区的地形复杂,土地资源相对匮乏,农业生产受到一定程度的限制,农作物植被覆盖程度低。

黄河流域NDVI与第二产业增值偏相关系数为-0.95~0.97(图9b),其中呈负相关的面积占7.47%,集中分布在青海省、内蒙古和关中平原城市群,零星分布于山西省和甘肃省,大规模煤炭和石油的开采导致生态环境受损,矿废堆积和污染物的排放加速了土地沙化和植被破坏的进程;呈正相关的面积占比10.81%,主要分布在山西省、甘肃省中部和陕西省北部。

(2) 地区生产总值对植被覆盖的影响

黄河流域2001—2021年年均GDP为0.59×10^4~152336×10^{4}元·km^{-2}(图10)。从社会经济发展状况来看,“胡焕庸线”东西两侧差异悬殊,东侧绝大多数区域城镇化水平高于西侧。NDVI与GDP偏相关系数为-0.97~0.99,与GDP呈正相关的区域面积占68.1%,呈负相关的区域面积占0.95%。NDVI与GDP呈正相关的地区受第一产业主导,农林业等活动直接改变土地利用和植被覆盖;呈负相关的地区集中在关中平原和中原城市群,零星分布于内蒙古和山西省,受第二产业主导,工业活动间接影响植被,表明黄河流域NDVI与第一产业的相关性强于第二产业。

3.4 NDVI影响因子驱动分区

通过分区准则(表1)制作黄河流域植被覆盖变化因子驱动分区图(图11),降水、气温因素驱动占3.41%,零星分布在毛乌素沙地、甘肃省兰州市和白银市等地区附近。降水、气温和GDP共同因素驱动占16.55%,主要分布在内蒙古呼和浩特市、宁夏吴

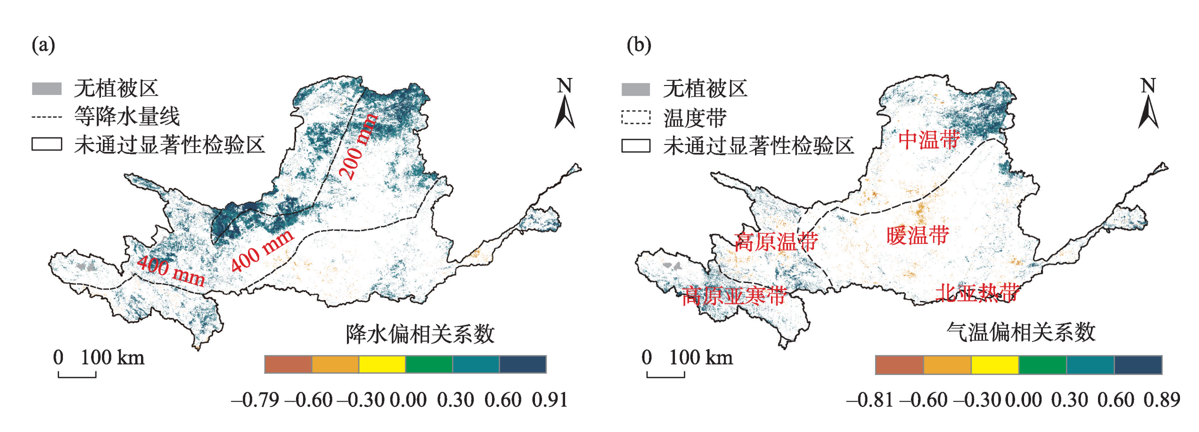


图7 2001—2021年黄河流域NDVI与降水(a)及温度(b)偏相关系数的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of partial correlation coefficients of NDVI with precipitation (a) and temperature (b) in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

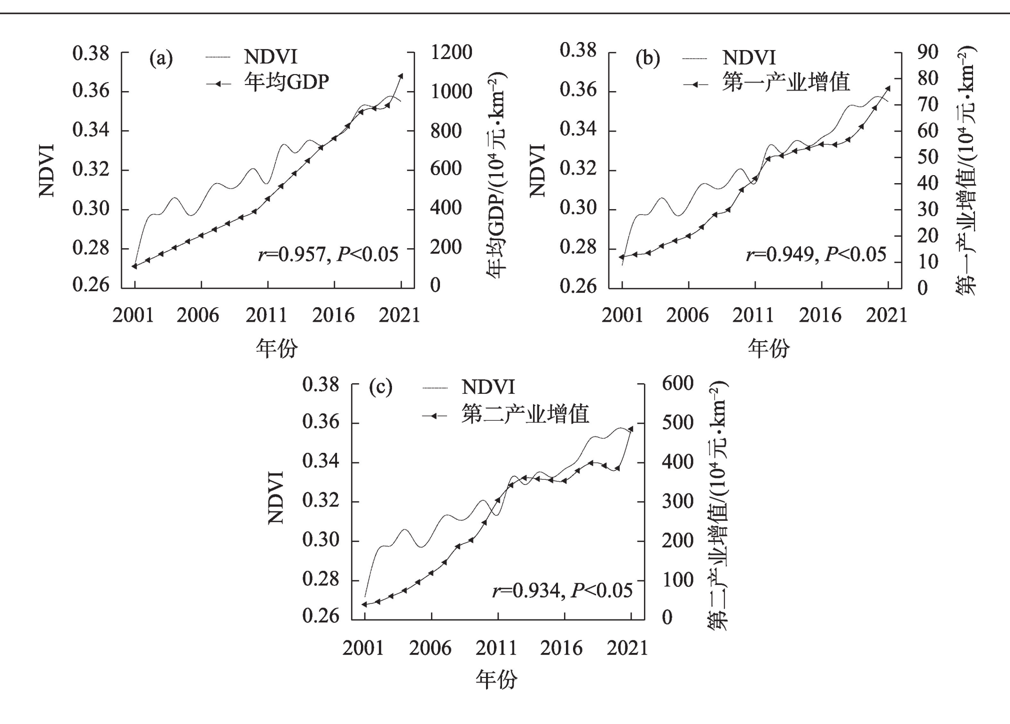


图8　2001—2021年黄河流域NDVI与年均GDP、第一产业增值和第二产业增值相关分析

Fig. 8　Correlation analysis between NDVI and average annual GDP, primary industry value-added and secondary industry value-added in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

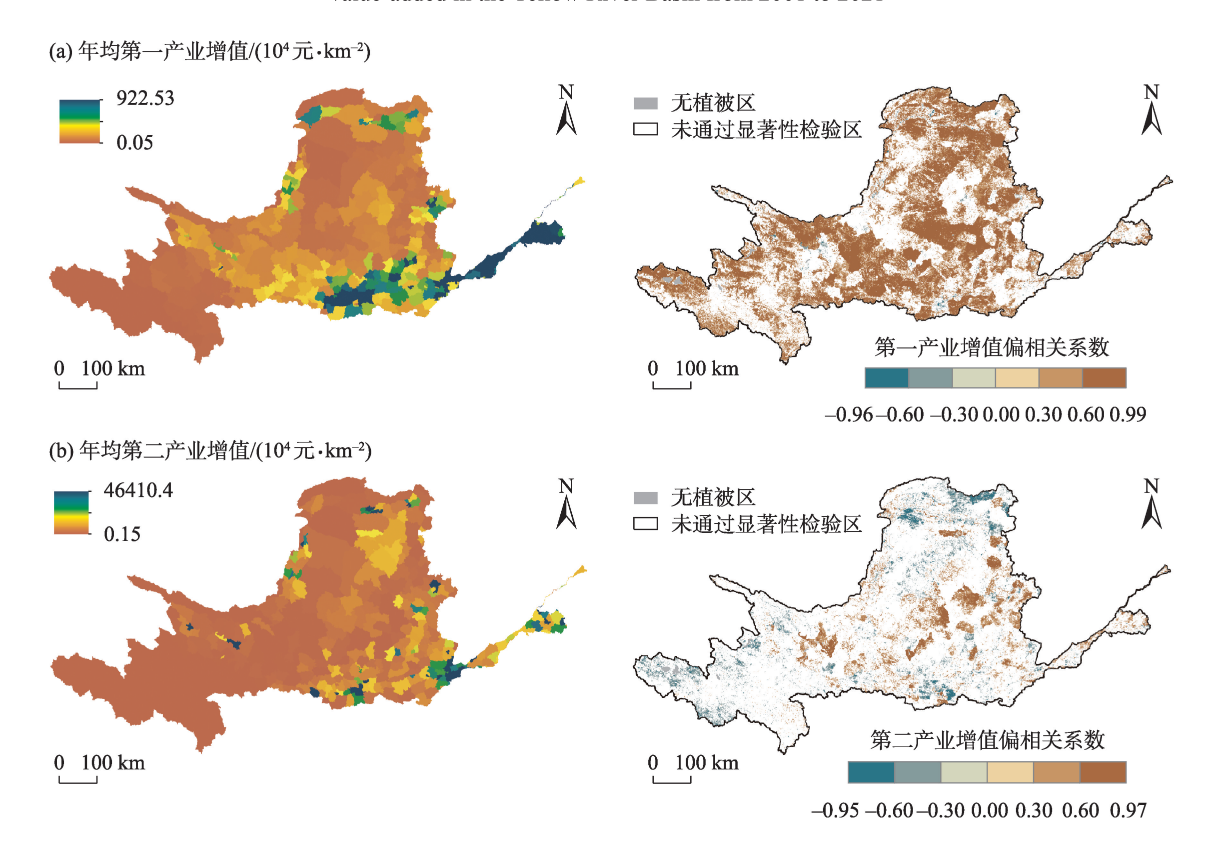


图9　2001—2021年黄河流域年均第一产业增值、NDVI与年均第一产业增值偏相关系数(a)、年均第二产业增值、NDVI与年均第二产业增值偏相关系数(b)的空间分布

Fig. 9　Spatial distribution of the average annual value-added of the primary industry, the partial correlation coefficient between NDVI and the average annual value-added of the primary industry (a), the average annual value-added of the secondary industry, and the partial correlation coefficient between NDVI and the average annual value-added of the secondary industry (b) in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

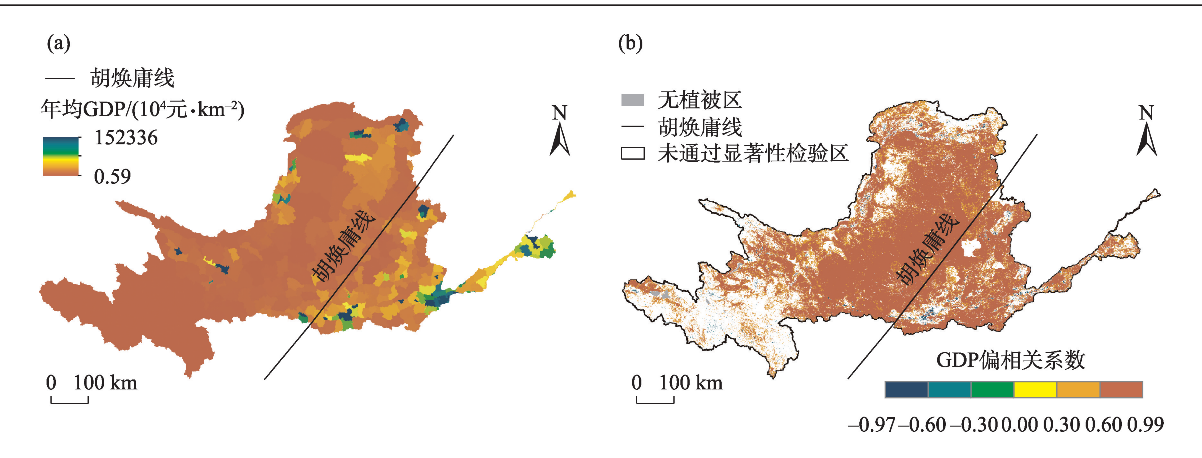


图10 2001—2021年黄河流域年均GDP、NDVI与年均GDP偏相关系数的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of the annual average GDP (a), and the partial correlation coefficient between NDVI and GDP (b) in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

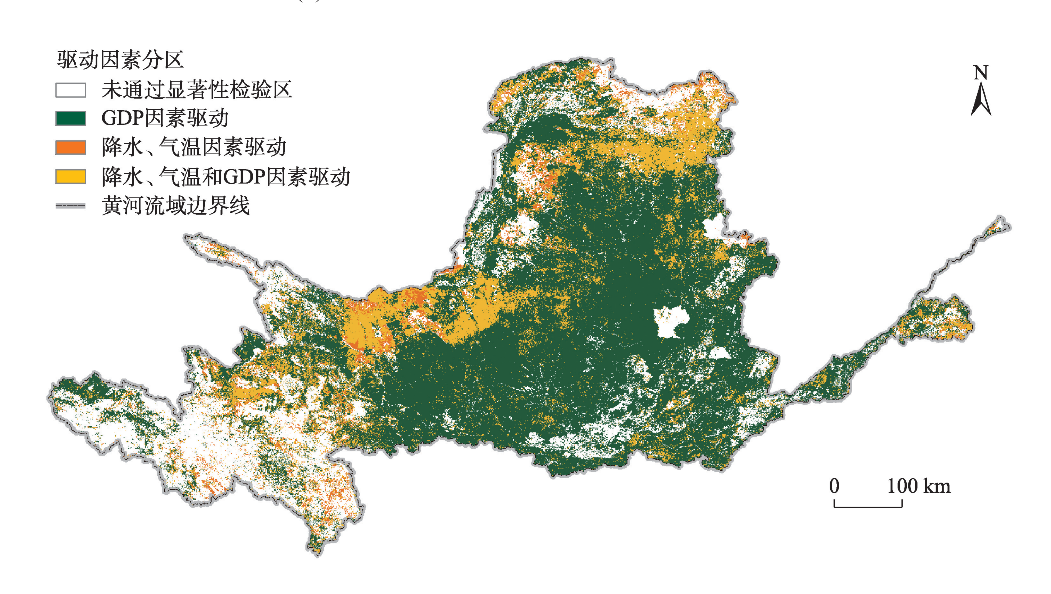


图11 2001—2021年黄河流域植被覆盖变化因子驱动分区

Fig. 11 Vegetation cover change factors drive zoning in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

忠市和甘肃兰州市等地区。黄河流域内GDP因素驱动范围最大，占整个研究区55.25%，表明人类经济活动因子对NDVI的影响大于降水和气温。35.29%的地区未通过显著性检验，这些地区NDVI与降水、气温和GDP的相关性弱，可能与光照、土壤类型、地形和人口密度等相关。

4 讨论

黄河流域2001—2021年NDVI呈上升趋势，增长速度为0.35%·a^{-1}，其中夏季和秋季增长最快，这与孙高鹏等[32–34]的研究结果一致。研究期间，流域内植被增加的面积占比81.33%，流域中游(黄土高原陕北段、山西河谷地区)处于退耕还林和人工造林重点实施区域[35–37]，一定程度上防止水土流失和改善土壤质量，促进了植被恢复和NDVI增加。张志强等[36,38]发现，关中盆地及中原城区城市扩张会导致植被减少，佐证了本文关中平原和中原城市群NDVI显著减少的现象，城市发展迅速、土地利用类型变化活跃，耕地和草地面积不断缩减，人类频繁活动导致植被减少。

研究区NDVI对降水和气温的响应存在明显的滞后性，这与植被类型及生命周期相关。黄河流域上游以草地为主，草本植物生长周期相对较短，对气候响应较快；林地主要分布于中下游，乔木生长周期长响应慢[17]。NDVI与降水呈正相关区域集中于200 mm等降水量线一带，地处干旱和半干旱地区[39]，水分供应不足[38]，植物生长缓慢。NDVI与温度呈

正相关区域分布于流域内高原亚寒带及中温带北部，前者海拔高、常年低温[18]，植被发育受限；后者冬长夏短，昼夜温差大，常伴有霜冻及降雪[40-41]，植被生存环境恶劣。NDVI与气温在陕西西北地区呈负相关，与赵倩倩等[13]的研究一致，该区域受温度影响不明显，可能是退耕还林等人为因素起主要作用。

黄河流域2001—2021年经济剧烈增长，“胡焕庸线”东西两侧各区县GDP差异悬殊，但NDVI对GDP的响应突破了“胡焕庸线”约束。其中NDVI与第一产业呈正相关，面积占比51.45%。黄河流域是中国重要的农业基地，保护性耕作、滴灌等技术提高了土壤湿度，土壤肥力增加，2006—2021年农业总产值不断提高，农业生态效率持续上升[42]。20世纪90年代，我国实施“退耕还林还草”和“三北防护林工程”[43]，草地和林地面积不断扩大，黄河流域植被覆盖情况逐渐改善，与赵安周等[44]的研究结果一致。0.84%的地区NDVI与第一产业呈负相关，这可能是由于过度放牧、过度开垦等因素导致的。47.71%的地区未通过显著性检验，这些地区植被受第一产业影响较弱。NDVI与第二产业呈负相关，面积占比7.47%，分布于青海东部、内蒙古北部及陕西南部等地区，煤矿资源丰富，矿区开采导致地表裸露、生态脆弱等一系列环境问题，严重破坏植被[45-46]。10.81%的地区呈正相关，主要分布在陕西北部、山西及甘肃中部。陕西和甘肃矿区城市的生态环境本底脆弱性较弱，矿产资源的开发对地表植被造成的胁迫性不显著[47]。通过复垦、育林、人工恢复群落等方法，2011年后流域内植被覆盖面积和种类丰富度显著提升[48-49]，生态修复措施已见成效。81.72%的地区未通过显著性检验，两者在该区域不存在明显相关性。

本研究仅选取了降水和气温作为气候因素、GDP作为人类经济活动指标，未来的研究可以结合光照、辐射等气候因素、人口密度和城市扩张等人为因素完善黄河流域植被变化的影响机制，以及结合第三产业和产业结构转型，进一步细化产业对生态环境产生的影响。

5 结 论

本文基于MOD13A3数据、气象数据和经济数据，分析了近21 a黄河流域植被指数的时空变化特征及其驱动因素。主要结论如下：

（1）黄河流域2001—2021年间植被覆盖变化整体呈增长趋势，增长速率为0.35%·a^{-1}，季节变化以夏季增长速率最快，秋季次之。植被覆盖类型以中植被和中高植被类型为主。关中平原城市群和中原城市群NDVI呈退化趋势，但流域内81.33%的地区植被覆盖面积呈扩张趋势。

（2）黄河流域植被NDVI对气候的响应存在滞后性，与降水的相关性大于气温。NDVI对降水的响应围绕在200 mm等降水量线附近，对温度的响应体现在高原亚寒带和中温带地区。人类活动对NDVI的影响已经突破了“胡焕庸线”，NDVI与第一产业呈正相关关系区域占比51.45%，与第二产业呈负相关的区域占比7.47%，NDVI与第一产业的相关性大于第二产业。

（3）黄河流域植被覆盖变化受气候和人类活动共同影响，以人类经济活动为主要驱动因子的地区面积占比55.25%；降水、气温因素驱动占整个研究区3.41%，分布在甘肃省兰州市和白银市等地区附近，降水量、温度等自然气候条件对该地区植被生长具有较大影响。降水、气温和GDP因素共同驱动占整个研究区16.55%，主要分布在内蒙古呼和浩特市、宁夏吴忠市和甘肃兰州市等地区。

参考文献（References）：

[1] 辛雨. 2022年度全球气候状况报告发布[N]. 中国科学报, 2023-03-21(001). [Xin Yu. Global Climate Status Report 2022 Released [N]. China Science Daily, 2023-03-21(001).]

[2] 李霞, 王孝康, 刘秀花, 等. 2000—2020年陕西省植被NDVI时空变化及气候因子探测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 1-11. [Li Xia, Wang Xiaokang, Liu Xiuhua, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and climate factor detection in Shaanxi Province from 2000-2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 1-11.]

[3] 赖金林, 齐实, 廖瑞恩, 等. 2000—2019年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 155-163. [Lai Jinlin, Qi Shi, Liao Rui'en, et al. Vegetation change responses to climate change and human activities in southwest alpine canyon areas of China from 2000 to 2019[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(14): 155-163.]

[4] 刘海, 刘凤, 郑粮. 气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 143-151. [Liu Hai, Liu Feng, Zheng Liang. Effects of climate change and human activ-

ities on vegetation cover change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 143-151.]

[5] 吴姗薇. 影响植被覆盖变化驱动因子的研究综述[J]. 科技视界, 2019(27): 103-106. [Wu Shanwei. A review on the vegetation cover change and its driving factors[J]. Science and Technology Vision, 2019(27): 103-106.]

[6] 马启民, 贾晓鹏, 王海兵, 等. 气候和人为因素对植被变化影响的评价方法综述[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 48-55. [Ma Qimin, Jia Xiaopeng, Wang Haibing, et al. Recent advances in driving mechanisms of climate and anthropogenic factors on vegetation change[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(6): 48-55.]

[7] 何远政, 黄文达, 赵昕, 等. 气候变化对植物多样性的影响研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 59-66. [He Yuanzheng, Huang Wenda, Zhao Xin, et al. Review on the impact of climate change on plant diversity[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 59-66.]

[8] Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Investigating the spatially heterogeneous relationships between climate factors and NDVI in China during 1982 to 2013[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(10): 1597-1609.

[9] 路建兵, 鞠珂, 廖伟斌. 2000—2020年甘肃省植被覆盖特征及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 中国沙漠, 2023, 43(4): 118-127. [Lu Jianbing, Ju Ke, Liao Weibin. Variation in NDVI and its response to climate change and human activities in Gansu Province during 2000-2020[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(4): 118-127.]

[10] Han G F, Xu J H. Influence of population and economic development on vegetation: A case study in Chongqing City [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 785-792.

[11] 张勇. 黄河流域生态保护和高质量发展研究[J]. 农业科技与信息, 2023(11): 77-80. [Zhang Yong. Research on ecological protection and high quality development of the Yellow River Basin[J]. Agricultural Science Technology and Information, 2023(11): 77-80.]

[12] 李海生. 黄河流域生态环境问题系统识别与展望[J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 1-10. [Li Haisheng. Systematic identification and prospect of eco-environmental problems in the Yellow River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(1): 1-10.]

[13] 赵倩倩, 李建华, 张桂琴, 等. 气候变化背景下黄河流域植被变化及其成因[J]. 气候与环境研究, 2022, 27(1): 157-169. [Zhao Qianqian, Li Jianhua, Zhang Guiqin, et al. Vegetation changes and their causes in the Yellow River Basin under the background of climate change[J]. Climatic and Environmental Research, 2022, 27(1): 157-169.]

[14] 解晗, 同小娟, 李俊, 等. 2000—2018年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4536-4549. [Xie Han, Tong Xiaojuan, Li Jun, et al. Changes of NDVI and EVI and their responses to climatic variables in the Yellow River Basin during the growing season of 2000-2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4536-4549.]

[15] 王祎宸, 贺洁, 何亮, 等. 黄河流域2001—2020年植被物候及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(2): 1-14. [Wang Yichen, He Jie, He Liang, et al. Vegetation phenology and its response to climate change in the Yellow River Basin from 2001 to 2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 1-14.]

[16] 李敏, 张艳. 黄河流域中段植被覆盖时空变化特征及影响因素分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(1): 10-20. [Li Ming, Zhang Yan. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of vegetation cover in the middle Yellow River Basin[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2023, 41(1): 10-20.]

[17] 魏潇, 张立峰, 何毅, 等. 2000—2020年黄河流域不同植被类型时空变化特征及其影响因素[J/OL]. 自然资源遥感. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.p.20230830.1130.010.html, 2023-08-31. [Wei Xiao, Zhang Lifeng, He Yi, et al. Spatial and temporal variation characteristics of different vegetation types in Yellow River Basin and their influencing factors from 2000 to 2020[J/OL]. Remote Sensing for Natural Resources. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.p.20230830.1130.010.html, 2023-08-31.]

[18] 张乐艺, 李霞, 冯京辉, 等. 2000—2018年黄河流域NDVI时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 276-286. [Zhang Leyi, Li Xia, Feng Jinghui, et al. Spatial-temporal changes of NDVI in Yellow River basin and its dual response to climate change and human activities during 2000-2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 276-286.]

[19] 焦士兴, 林璐霜, 王安周, 等. 黄河流域9省区经济发展、产业结构与环境污染关系[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版). http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20231204.0916.002.html, 2023-12-04. [Jiao Shixing, Lin Lushuang, Wang Anzhou, et al. Relationship among the economic development, industrial structure and environmental pollution in the nine provincial regions of the Yellow River Basin[J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition). http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20231204.0916.002.html, 2023-12-04.]

[20] 丁金宏, 程晨, 张伟佳, 等. 胡焕庸线的学术思想源流与地理分界意义[J]. 地理学报, 2021, 76(6): 1317-1333. [Ding Jinhong, Cheng Chen, Zhang Weijia, et al. The ideological origins and geographical demarcation significance of Hu Huanyong Line[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(6): 1317-1333.]

[21] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.

[22] 陈春波, 李均力, 赵炎, 等. 新疆草地时空动态及其对气候变化的响应——以昌吉回族自治州为例[J]. 干旱区研究, 2023, 40(9): 1484-1497. [Chen Chunbo, Li Junli, Zhao Yan, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland vegetation and its responses to climate change in Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(9): 1484-1497.]

[23] 徐虹, 刘琴. 2001—2019年云南省植被NDVI变化及其气候因

子的关系[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 162-168. [Xu Hong, Liu Qin. Analysis of vegetation NDVI dynamic and its relationship with climatic factors in Yunnan Province during 2001-2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 162-168.]

[24] 吴万民, 刘涛, 陈鑫. 西北干旱半干旱区NDVI季节性变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1969-1981. [Wu Wanmin, Liu Tao, Chen Xin. Seasonal changes of NDVI in the arid and semi-arid regions of Northwest China and its influencing factors[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 1969-1981.]

[25] Pei Z F, Fang S B, Yang W N, et al. The relationship between NDVI and Climate factors at different monthly time scales: A case study of grasslands in inner Mongolia, China (1982-2015)[J]. Sustainability, 2019, 11(24): 7243.

[26] Wang H J, Li Z, Niu Y, et al. Evolution and climate drivers of NDVI of natural vegetation during the growing season in the arid region of Northwest China[J]. Forests, 2022, 13(7): 1082.

[27] 赵雨琪, 魏天兴. 1990—2020年黄土高原典型县域植被覆盖变化及影响因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(1): 147-156. [Zhao Yuqi, Wei Tianxing. Changes in vegetation cover and influencing factors in typical counties of the Loess Plateau from 1990 to 2020 [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(1): 147-156.]

[28] 谢胜金, 刘永和, 姚风欣. 1998—2015年北京市NDVI时空变化及其与气候因子的响应关系[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 190-196. [Xie Shengjin, Liu Yonghe, Yao Fengxin. Spatial-temporal characteristics of NDVI and its relationship with climate change in Beijing from 1998 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 190-196.]

[29] 王永财, 孙艳玲, 王中良. 1998—2011年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 594-602. [Wang Yongcai, Sun Yanling, Wang Zhongliang. Spatial-temporal change in vegetation cover and climate factor drivers of variation in the Haihe River Basin 1998-2011[J]. Resources Science, 2014, 36(3): 594-602.]

[30] 石悦樾, 银正彤, 郑文锋. 基于MODIS数据乌江流域植被覆盖变化与气候变化关系研究[J]. 林业资源管理, 2017(1): 127-134. [Shi Yueyue, Yin Zhengtong, Zhen Wenfeng. Study on the response of vegetation cover change and climate change in Wujiang River Basin based on MODIS data[J]. Forest Resources Management, 2017(1): 127-134.]

[31] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992年中国陆地NDVI变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720. [Chen Yunhao, Li Xiaobing, Shi Peijun. Variation in NDVI Driven by climate factorsacross China, 1983-1992[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 25(6): 716-720.]

[32] 孙高鹏, 刘宪锋, 王小红, 等. 2001—2020年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 205-212. [Sun Gaopeng, Liu Xianfeng, Wang Xiaohong, et al. Changes in vegetation coverage and its influencing factors across the Yellow River Basin during 2001-2020[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41 (4): 205-212.]

[33] Ren Y Q, Liu J P, Liu S X, et al. Effects of climate change on vegetation growth in the Yellow River Basin from 2000 to 2019[J]. Remote Sensing, 2022, 14(687): 687.

[34] 闫奕飞, 白强, 孙虎, 等. 黄河流域植被变化和产水服务的时空特征分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 1-10. [Yan Yifei, Bai Qiang, Sun Hu, et al. Analysis of spatio-temporal characteristic of vegetation cover and water production services in the Yellow River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 1-10.]

[35] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被NPP变化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 584-593. [Yang Dan, Wang Xiaofeng. Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 584-593.]

[36] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 849-858. [Zhang Zhiqiang, Liu Huan, Zuo Qiting, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000-2019[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 849-858.]

[37] Jian S Q, Zhang Q K, Wang H L. Spatial-temporal trends in and attribution analysis of vegetation change in the Yellow River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14: 4607.

[38] 王一, 郝利娜, 许强, 等. 2001—2019年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2397-2407. [Wang Yi, Hao Lina, Xu Qiang, et al. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its geographical factors analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2397-2407.]

[39] 郭帅, 裴艳茜, 胡胜, 等. 黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 1-7. [Guo Shuai, Pei Yanqian, Hu Sheng, et al. Response of vegetation index to climate change and their relationship with runoff sediment change in Yellow River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 1-7.]

[40] 李建飞, 李小兵, 周义. 2000—2015年乌兰察布市生长季NDVI时空变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1238-1249. [Li Jianfei, Li Xiaobing, Zhou Yi. Spatiotemporal variation of NDVI and its affecting factors in Ulanqab City in growing season from 2000 to 2015[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1238-1249.]

[41] 刘育坤, 刘晓波, 孙亚丽, 等. 基于RS与GIS的呼和浩特市植被覆盖度变化分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2020(7): 47-50. [Liu Yukun, Liu Xiaobo, Sun Yali, et al. Analysis of vegetation coverage change in Hohhot City based on RS and GIS[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2020(7): 47-50.]

[42] 何妮, 姚聪莉, 张畅. "双碳"目标下黄河流域农业生态效率的动态演进与收敛特征[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2024, 24(3): 149-160. [He Ni, Yao Congli, Zhang Chang. Dynamic evolution and convergence characteristics of agricultural ecological efficiency in the Yellow River Basin under the "Dual Carbon"

Goal[J]. Journal of Northwest A & F University (Social Science Edition), 2024, 24(3): 149−160.]

[43] 周锡饮, 师华定, 王秀茹. 气候变化和人类活动对蒙古高原植被覆盖变化的影响[J]. 干旱区研究, 2014, 31(4): 604−610. [Zhou Xiyin, Shi Huading, Wang Xiuru. Impact of climate change and human activities on vegetation coverage in the Mongolian Plateau [J]. Arid Zone Research, 2014, 31(4): 604−610.]

[44] 赵安周, 田新乐. 基于GEE平台的1986—2021年黄土高原植被覆盖度时空演变及影响因素[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2124−2133. [Zhao Anzhou, Tian Xinle. Spatiotemporal evolution and influencing factors of vegetation coverage in the Loess Plateau from 1986 to 2021 based on GEE platform[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(11): 2124−2133.]

[45] 韩素娟. "一带一路"背景下青海省产业结构转型升级研究[J]. 青海民族研究, 2021, 32(1): 179−185. [Han Sujuan. The research of the transformation and upgrading of industry structure of Qinghai Province under the background of one Belt and Road initiative [J]. Nationalities Research in Qinghai, 2021, 32(1): 179−185.]

[46] 许强. 内蒙古煤炭经济发展问题及其策略研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(21): 114−116. [Xu Qiang. Research on the development of coal economy in Inner Mongolia and its strategies[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2023(21): 114−116.]

[47] 马丽, 田华征, 康蕾. 黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 137−149. [Ma Li, Tian Huazheng, Kang Lei. Eco-environmental impact and spatial control of mineral resources exploitation in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 137−149.]

[48] 焦晓亮, 田金梅, 周永利. 黄河流域露天矿排土场生态修复评价[J]. 煤炭工程, 2020, 52(S2): 74−79. [Jiao Xiaoliang, Tian Jinmei, Zhou Yongli. Ecological restoration evaluation of coalmine dumps in Yellow River Basin[J]. Coal Engineering, 2020, 52(S2): 74−79.]

[49] 陈静. 黄河流域煤矿区生物多样性的保护与恢复——以神东矿区为例[J/OL]. 煤炭工程. https://link.cnki.net/urlid/11.4658.td.20231225.1623.002, 2023−12−28. [Chen Jing. Conservation and restoration of biodiversity in coal mining areas of the Yellow River Basin: A case study of Shendong mining area[J/OL]. Coal Engineering. https://link.cnki.net/urlid/11.4658.td.20231225.1623.002, 2023−12−28.]

Changes in vegetation cover and driving factors in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

WU Siyuan, HAO Lina

(College of Geography and Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: As an important ecological barrier and economic corridor in China, the study of the Yellow River Basin reveals the response mechanism of vegetation cover change, which is conducive to promoting the coordinated development of ecology, economy, and society. Based on MOD13A3 climate and economic data, this paper uses trend analysis and correlation analysis to determine the characteristics of vegetation cover change in the Yellow River Basin from 2001 to 2021, and explores the mechanisms of impact of climate and human activities on vegetation. The results show that: (1) From 2001 to 2021, the rate of vegetation cover increase in the study area was $0.35\%\cdot a^{-1}$, and the vegetation cover in 81.33% of the area followed an increasing trend. (2) On the time scale, the NDVI response to climate and human activities in the Yellow River Basin lags; on the spatial scale, NDVI is positively correlated with precipitation and temperature. NDVI's response to precipitation is concentrated in the 200 mm precipitation line, and its response to temperature is distributed in the plateau subarctic zone and the middle temperate zone. The impact of human economic activities on NDVI was a predominantly positive correlation, among which NDVI was positively correlated with the primary industry and negatively correlated with the secondary industry, accounting for 51.45% and 7.47% of the total area, respectively. (3) The vegetation change in the Yellow River Basin is affected by both climate and human activities. The area affected by human economic activity factors comprised 55.25% of the total area, which was a majority, indicating that human activities, such as economic development, have a significant impact on the growth and distribution of vegetation that exceeds the effects of precipitation and temperature changes.

Keywords: NDVI; climate; human activity; vegetation coverage change; driving factors; Yellow River Basin